

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.075>



基于 Newmark 模型的桩锚组合加固边坡动力响应分析

彭 铭^{1,2}, 何龙坤^{1,2}, 孙 蕊^{1,2*}, 齐 辉^{3,4}, 崔新壮⁵, 毕竞超⁶, 杜长城^{1,2}, 赵庆新^{1,2}

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092
2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092
3. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250061
4. 山东高速集团有限公司, 山东济南 250098
5. 山东大学土建与水利学院, 山东济南 250062
6. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063

摘 要: 抗滑桩和锚索组合结构可以充分发挥抗滑桩的刚性约束和锚索的主动张拉来控制边坡变形, 表现出良好的抗震性能, 已被广泛应用于强震区滑坡防治。然而, 目前关于桩锚组合结构加固边坡的地震动力响应研究较少, 其协同抗震机制尚不明确。基于 Newmark 模型, 提出了一种考虑地震时程特性的桩锚组合结构加固边坡的动力响应分析方法。并将该方法应用于山东高速公路高边坡, 分析了不同加固方式下边坡的永久位移、安全系数以及支护结构的内力。结果表明, 桩锚组合结构有效减小了边坡永久位移, 确保边坡的稳定性; 桩锚组合支护相较于仅锚支护和仅桩支护, 锚固端的最大锚固拉力、桩身最大剪力和最大弯矩均有所减小; 随着黏聚力和内摩擦角的增大, 边坡屈服加速度呈正比例增加, 而永久位移则从急剧减小过渡到缓慢下降, 其中黏聚力的影响更为显著。桩锚组合结构通过形成主动受力体系, 增大了边坡的屈服加速度, 实现了桩和锚索的协调受力, 防止滑面附近应力过度集中, 是一种高效的加固方式。

关键词: Newmark 模型; 桩—锚组合结构; 永久位移; 地震; 有限元分析; 工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000—2383(2025)10—3857—16

收稿日期: 2025-01-03

Seismic Performance Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Combination Based on Newmark Model

Peng Ming^{1,2}, He Longkun^{1,2}, Sun Rui^{1,2*}, Qi Hui^{3,4}, Cui Xinzhuan⁵, Bi Jingchao⁶, Du Changcheng^{1,2}, Zhao Qingxin^{1,2}

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Ji'nan 250061, China
4. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Ji'nan 250098, China
5. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan 250062, China
6. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China

基金项目: 国家自然科学基金—联合基金项目(No. U23A2044); 国家重点研发计划项目(No. 2019YFC1509702)。

作者简介: 彭铭(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害、大坝安全与溃坝机理分析。E-mail: pengming@tongji.edu.cn

*** 通讯作者:** 孙蕊(1993—), 女, 博士, 博士后, 主要从事加筋土边坡动力响应及可靠度分析。E-mail: sr-tjut@tongji.edu.cn

引用格式: 彭铭, 何龙坤, 孙蕊, 齐辉, 崔新壮, 毕竞超, 杜长城, 赵庆新, 2025. 基于 Newmark 模型的桩锚组合加固边坡动力响应分析. 地球科学, 50(10): 3857—3872.

Citation: Peng Ming, He Longkun, Sun Rui, Qi Hui, Cui Xinzhuan, Bi Jingchao, Du Changcheng, Zhao Qingxin, 2025. Seismic Performance Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Combination Based on Newmark Model. *Earth Science*, 50(10): 3857—3872.

Abstract: The composite structure of anti-slide pile and anchor cable can give full play to the rigid constraint of anti-slide pile and the active tension of anchor cable to control slope deformation, showing good seismic performance, and has been widely used in landslide prevention in strong earthquake areas. However, at present, there is little research on the seismic dynamic response of slope strengthened by pile-anchor composite structure, and its cooperative seismic mechanism is not clear. Based on Newmark model, this paper presents a dynamic response analysis method of slope strengthened by pile-anchor composite structure considering earthquake time-history characteristics. The method is applied to the high slope of Shandong expressway, and the permanent displacement, safety factor and internal force of supporting structure of the slope with different reinforcement methods are analyzed. The results show that the pile-anchor composite structure effectively reduces the permanent displacement of the slope and ensures the stability of the slope. Compared with only anchor support and only pile support, the maximum anchorage tension at the anchorage end, the maximum shear force and the maximum bending moment of the pile body are reduced. With the increase of cohesion and internal friction angle, the yield acceleration of slope increases in direct proportion, while the permanent displacement transitions from sharp decrease to slow decrease, in which the influence of cohesion is more significant. By forming an active stress system, the pile-anchor composite structure increases the yield acceleration of the slope, realizes the coordinated stress of the pile and the anchor cable, and prevents excessive stress concentration near the sliding surface, which is an efficient reinforcement method.

Key words: newmark slider analysis method; pile-anchor combination; permanent displacement; earthquake; finite element analysis method; engineering geology.

0 引言

我国正在建设川藏铁路,西部陆海新通道和高速公路、铁路网等重大工程,“十四·五”规划重大工程与滑坡灾害影响范围大面积重合.强烈地震诱发的滑坡及其次生灾害造成了严重的生命财产损失(郭长宝等,2024;吴佳杰等,2025;杨婷等,2025).抗滑桩和锚索组合结构(以下简称:桩锚组合结构)通过充分发挥其抗滑桩的刚性约束和锚索的主动张拉来控制边坡变形,在地震易发区高路堑边坡中发挥着重要作用(周德培等,2010;陈建峰等,2022).由于地震动力作用的时程效应和桩锚组合结构与边坡岩土体的复杂相互作用,导致桩锚组合结构加固边坡的动力响应机制还不清楚.因此,如何充分考虑地震的时程作用、岩土体的瞬时塑性效应和结构—岩土体的耦合作用,揭示桩锚组合结构的地震动力规律,是亟待解决的关键问题.

现有地震作用下边坡动力响应分析方法主要有拟静力法、拟动力法和地震时程分析法(高树飞等,2015;Du, 2018;张磊等,2020).拟静力法将地震动力荷载等效为水平和竖直两个方向的静力荷载(Nouri *et al.*, 2006;罗强等,2010;高树飞和冯云芬,2022).该方法原理简单,效率较高,但未能考虑地震的时程特性和地震放大效应,致使边坡稳定性分析结果与实际存在偏差.拟动力法考虑了时间、地震放大效应的影响,合理地模拟了地震的动力特性,但由于计算所需参数较为复杂,还不能适用于大多

数工程实践(马晓文等,2021).地震时程分析法考虑了岩土体参数在空间上的复杂性以及岩土体材料的应力应变关系,可以为边坡变形提供详细信息(张伯艳等,2018;刘彪和张伯艳,2019),但该方法计算效率较低,难以得到广泛应用.

经研究发现,边坡在地震作用下可能会达到瞬时极限平衡状态(李见飞等,2020),在这种情况下边坡可能只会产生塑性变形累积,整体不会发生破坏(Wilson and Keefer, 1983).基于此,Newmark (1965)提出了Newmark滑块位移法,该方法被国内外学者大量地应用于地震滑坡危险性评估研究中(陈启国等,2011;徐光兴等,2012;葛华等,2013;金凯平等,2019;雷真等,2022).Newmark滑块位移法对斜面上的块体在地震动力作用对超越屈服加速度的部分进行二次积分而得到边坡的永久位移(Newmark, 1965; Veylon *et al.*, 2017).传统的Newmark分析方法假设块体是完全刚性,并未考虑桩锚组合结构加固对屈服加速的增强效应,导致计算结果存在较大误差.

对此,有学者在传统Newmark滑块位移法进行改进.李红军等(2006)考虑了土体在地震作用下的动强度,并使用Newmark滑块位移法研究了坝坡的震后位移;Kokusho(2019)提出了基于能量的Newmark方法,可以判断边坡是否滑塌破坏,且无需加速度时程还可以计算边坡的震后位移;Du(2018)为了提高原始Newmark方法的性能,通过量化校正因子提出了简单的预测模型,并探究了地震加速度的

垂直分量对斜坡位移的影响;Nadukuru and Michalowski (2013)则运用 Newmark 滑块位移法分析了在地震作用下岩质边坡的三维稳定性.现有改进的 Newmark 滑块位移法对地震作用下边坡稳定性评价具有重要指导意义.但地震的时程特性和桩锚组合结构复杂的协同作用,使得桩锚加固边坡的动力响应机制尚不明确,缺少永久位移与桩锚内力时程响应的关联分析.

鉴于此,本文基于 Newmark 滑块位移法,提出考虑地震时程特性的桩锚组合加固边坡动力响应分析方法.通过等效线性模型获取边坡的安全系数时程,采用 Newmark 法考虑桩锚结构对屈服加速度的影响,进一步计算桩锚组合加固边坡的永久位移和结构内力,从而量化地震作用下桩锚组合结构的加固效果.将该方法应用于山东济—潍高速公路 K56 路段高边坡,分析了无支护、仅锚支护、仅桩支护和桩锚组合支护 4 种工况下边坡的安全系数、永久位移以及支护结构的内力,检验桩锚组合结构加固边坡在地震荷载作用下的有效性.

1 基于 Newmark 模型的桩锚组合加固边坡动力响应分析方法

本文基于 Newmark 模型,考虑地震时程特性提出的一种桩锚组合结构加固边坡的动力响应分析方法.首先开展初始静态分析确定地震发生前地面应力的原位状态,接着开展等效线性动力状态分析,获取安全系数时程曲线和支护结构内力,最后采用 Newmark 模型,考虑桩锚组合结构对屈服加速度的影响,分析桩锚组合加固边坡的永久位移.

1.1 方法原理

1.1.1 初始静态分析 首先建立有限元模型对边坡进行初始静态分析来确定地震发生之前地面应力的原位状态.将静应力作为动力分析的初始条件得到边坡和加固结构在地震荷载作用下的动力响应.有限元分析中动力响应的控制运动方程可以表示为:

$$[M]\{\ddot{a}\} + [D]\{\dot{a}\} + [K]\{a\} = \{F\}, \quad (1)$$

式中: $[M]$ 表示质量矩阵, $[D]$ 表示阻尼矩阵, $[K]$ 表示刚度矩阵, $\{\ddot{a}\}$ 为节点加速度矢量, $\{\dot{a}\}$ 为节点速度矢量, $\{a\}$ 为节点位移矢量, $\{F\}$ 表示载荷矢量.

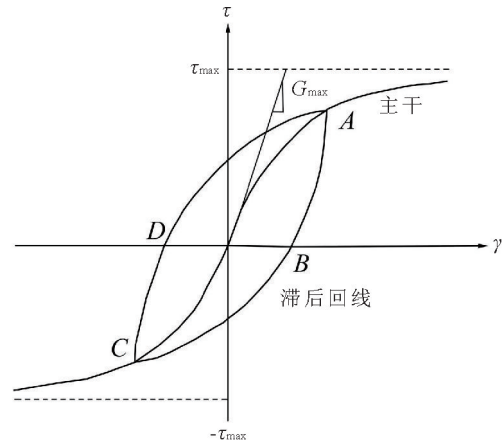


图 1 双曲主干曲线(Fkramer, 1995)

Fig.1 Hyperbolic backbone curve(Fkramer, 1995)

1.1.2 等效线性动力状态分析 然后采用等效线性模型作为土体的动力本构模型,考虑土体材料的弹塑性力学特性.等效线性模型通过主曲线变换考虑土体的滞回特性,迟滞曲线遵循 Masing 规则 (Fkramer, 1995).土的动应力—应变关系中的主干用双曲线表示(图 1),其方程由两个参数 $G_{\max}$ 和 $\tau_{\max}$ 定义.主干方程可以写成:

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{\max}} + \frac{\gamma}{\gamma_{\max}}} = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}. \quad (2)$$

卸载与反向加载曲线(ABC)可以表示为:

$$\tau = \tau_A + \frac{G_{\max}(\gamma - \gamma_A)}{1 + \frac{\gamma - \gamma_A}{2\gamma_r}}. \quad (3)$$

类似地,加载和反向卸载(CDA)可以表示为:

$$\tau = \tau_C + \frac{G_{\max}(\gamma - \gamma_C)}{1 + \frac{\gamma - \gamma_C}{2\gamma_c}}. \quad (4)$$

式中: τ 为剪应力, γ 为剪应变, $G_{\max}$ 为最大剪切模量, $\tau_{\max}$ 为最大剪应力, γ_r 为最大剪应力和最大剪切模量的比值, γ_A 为 A 点的剪应变, τ_A 为 A 点的剪应力, γ_C 为 C 点的剪应变, τ_C 为 C 点的剪应力.

采用极限平衡框架内的有限元应力法,同时可以得到安全系数的时程曲线.在有限元法计算应力的基础上,采用积分法计算滑面总抗剪力和总动剪力.设滑面的入口和出口分别为 A 和 B,安全系数定义为总抗剪力与总动剪力之比(Naylor, 1982):

$$F_s = \frac{\sum F_r}{\sum F_m} = \frac{\int_A^B \tau_f dS}{\int_A^B \tau dS}, \tag{5}$$

式中： F_s 为安全系数， F_r 为总抗剪力， F_m 为总动剪力， τ_f 为抗剪强度。

1.1.3 Newmark 变形分析 最后，应用 Newmark 滑块分析方法计算地震荷载作用下滑体沿滑面的永久变形。Newmark 滑块分析法将潜在的滑坡体看作位于斜面上的一个刚性滑块，如图 2 所示，当地震动加速度超过某一临界值 a_c 时，滑块克服剪切阻力开始滑动。加速度临界值 a_c 为屈服加速度，可以表示为：

$$a_c = (F_s - 1)g \sin \alpha, \tag{6}$$

式中： g 为重力加速度； F_s 为拟静力方法确定的安全系数，若 F_s 为桩锚组合加固边坡的安全系数，则考虑了桩和锚索对边坡抗滑力的贡献； α 为潜在滑动体的重心滑动方向与水平方向的夹角，通常可以近似为坡度角。

当确定了滑坡的屈服加速度，同时选择了地震动加速度时程，就可以通过对地震动时程中位于屈服加速度之上的部分进行双重积分来计算 New-

mark 位移 (Franklin and Chang, 1977)，图 3 为 Newmark 位移计算示意图。因此 Newmark 累计位移量可以表示为：

$$D = \int \int t(a(t) - a_c) dt dt, \tag{7}$$

式中： $a(t)$ 为地震加速度动时程； a_c 为屈服加速度。

1.2 计算流程

本文基于有限元分析软件 GeoStudio 来对桩锚组合加固边坡的动力响应开展分析。首先通过 SIGMA/W 板块的初始静态分析来确定地震发生之前地面应力的原位状态。然后将静态应力作为 QUAKE/W 动力分析的初始条件，得到边坡和加固

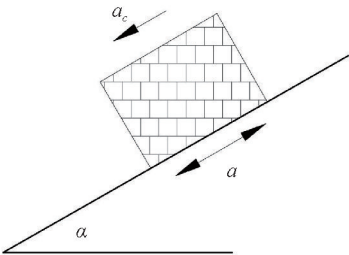


图 2 Newmark 位移滑块模型(Jibson and Michael, 2009)

Fig.2 Newmark displacement slider mode(Jibson and Michael, 2009)

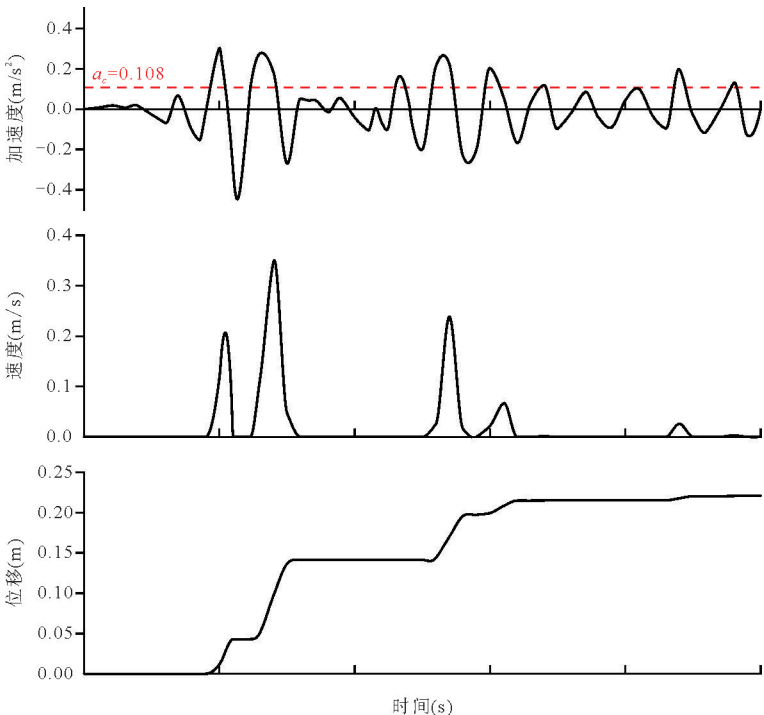


图 3 Newmark 位移计算示意图(Wilson and Keefer, 1983)

Fig.3 Newmark displacement calculation diagram(Wilson and Keefer, 1983)

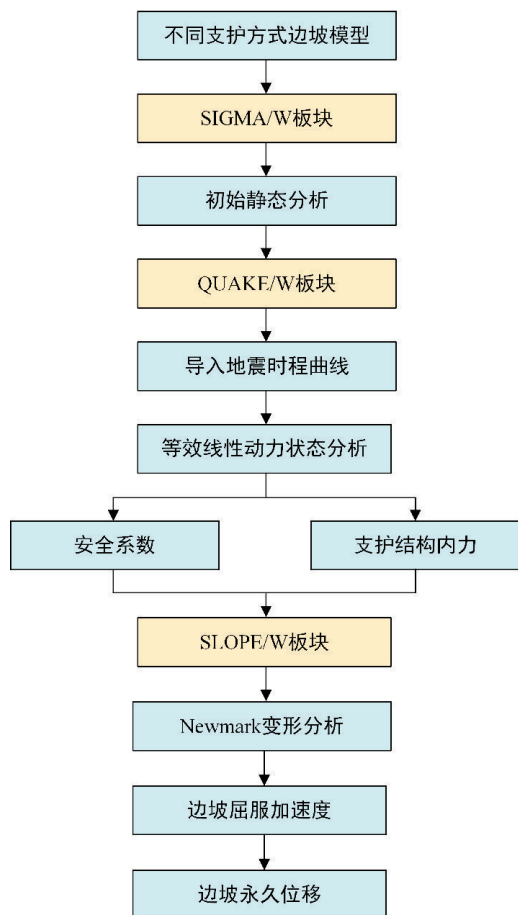


图4 基于 Newmark 模型的桩锚组合加固边坡动力响应分析方法计算流程

Fig.4 Calculation flow chart of dynamic response analysis method of slope reinforced by pile-anchor combination based on Newmark model

结构在地震荷载作用下的动力响应和安全系数,进而对支护结构的内力变化进行分析.最后,结合 SLOPE/W 模块对边坡进行 Newmark 变形分析,得到各工况下边坡地震荷载作用下滑体沿滑面产生的永久变形.图4为该方法的计算流程图.

2 案例分析

2.1 案例介绍

2020年,山东济一潍高速公路某段的公路边坡为深开挖和削坡设计.施工期间,坡顶边坡坍塌(图5a).为了调查原因,使用混合钻井技术钻取了3个钻孔(图5c所示的钻孔1、钻孔2和钻孔3).钻孔资料表明,边坡地层自上而下分别为粉质黏土、碎石土、强风化泥岩、强风化砂岩和弱风化砂岩.值得注意的是,在强风化泥岩和强风化砂岩之间的界面处

存在一层薄而软的软弱层.滑动面位于边坡三级平台处靠下约3.3~3.8 m处.为提高边坡稳定性,在三级平台处设置了3排微型钢管抗滑桩,排间距为0.75 m,直径为108 mm,厚度为5 mm,桩长16 m.同时设置一排锚索,直径为28 mm,自由段长12 m,锚固段长6 m,其顶部与最内侧桩顶相连接,图5b为现场施工期间及设计修改后的边坡图.

本研究考虑了4种不同的加固方案以检验桩锚组合结构加固边坡在地震荷载作用下的有效性:(1)无加固措施的边坡;(2)仅采用锚索加固的边坡;(3)仅采用抗滑桩加固的边坡;(4)采用桩—锚组合加固的边坡.Newmark 滑块分析用于检验加固边坡的稳定性,以评估地震荷载作用下桩锚结构加固边坡的抗震性能.

2.2 边坡模型

本文采用的数值模型的限制性条件如下:(1)所建边坡为平面二维模型,进行平面应变状态分析.(2)原型边坡地下水位较低,将土作为干燥材料,不考虑产生超孔隙水压力,采用总应力分析进行计算.(3)假设岩土体为理想弹塑性状态.

根据岩层分布,可建立简化的含有土岩接触面的边坡模型,高度为44 m.上层为土层,下层为岩层,中间为土岩接触面.图6为4种不同加固方案下边坡模型示意图.其中,锚索分为粘结部分(如图6b红色所示)和自由部分(如图6b蓝色所示),分别模拟锚固段和自由段.

在初始静态分析中,左右边界条件在水平方向上是固定的;在振动分析中,选择等效线性动力分析类型,仅垂直方向上的边界条件为固定.

2.3 材料参数

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015),本标段的地震动峰值加速度系数为0.15 g,抗震设防烈度为Ⅶ度.不同地震动记录的频谱成分、能量分布及幅值持时存在显著差异,单一地震波分析难以全面反映桩锚组合支护结构在复杂地震作用下的动力特性.鉴于此,本研究在模型基底施加水平方向地震波,分别选取基线校正后的 El Centro 波、鲁甸波及汶川波作为输入荷载,各波形持时均为50 s.不同地震波的时程记录如图7所示.

在 QUAKE/W 模块,边坡的土层、土岩界面和岩层采用弹塑性材料模型.基于现场钻孔岩芯的系统采样与室内物理力学试验数据,结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)建议值,边坡各层重

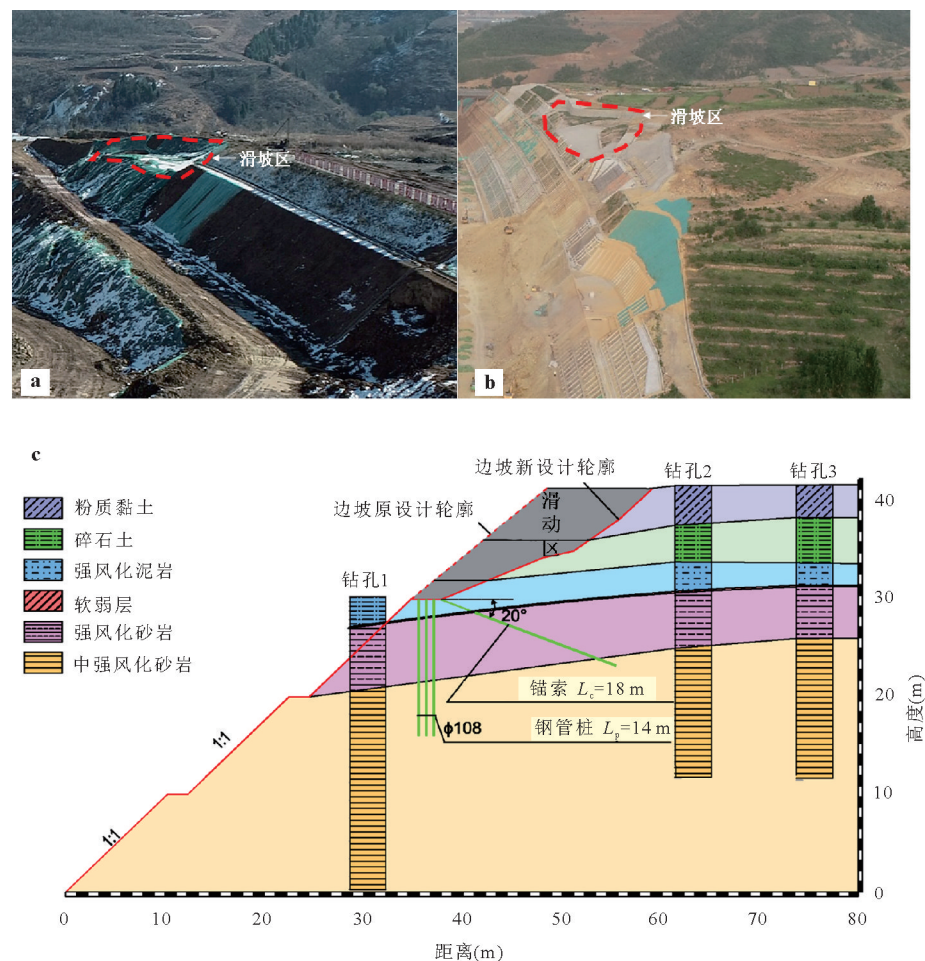


图 5 济南—潍坊高速公路边坡案例现场图和剖面图
Fig 5 On-site and cross-sectional diagrams of the slope case study along the Jinan-Weifang expressway
a. 施工期间边坡坡顶坍塌现场图; b. 设计修改后的边坡现场图; c. 修改后的边坡剖面图

度、泊松比、阻尼比如表 1 所示, $G_{\max}$ 取值为 5 000 kPa. 在 SLOPE/W 模块, 进行 Newmark 变形分析时, 采用 Mohr-Coulomb 材料模型, 边坡各层的重度、黏聚力、内摩擦角如表 1 所示. 桩和锚均假定为线弹性材料, 参数的计算取值遵循《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013) (中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014), 具体如表 2 所示.

2.4 数值结果与分析

本节首先对地震动力作用下边坡位移进行分析, 然后对比了不同工况下边坡的安全系数和永久位移, 最后讨论了加固结构在不同工况下的内力变化.

2.4.1 地震动力作用下边坡位移分析 根据边坡在等效线性动力状态下的位移云图可知 (图 8), 未支护时, 三级平台处边坡竖向位移较大, 位移最大值约为 2 mm. 仅锚支护后, 三级平台处的变形较大区域逐渐缩小, 最大位移约为 1.5 mm. 仅桩支护后,

三级平台处竖向位移显著减小, 最大值减少至 1 mm 左右. 因而, 抗滑桩的刚性支护相较于锚索的柔性支护更有效. 桩锚组合支护后, 三级平台处位移显著减低, 趋近于 0. 由此可见, 桩锚支护组合结构可以充分发挥抗滑桩的刚性约束和锚索的柔性约束作用, 控制边坡变形, 维持边坡稳定.

2.4.2 永久位移分析 为了全面评估桩锚组合结构在不同地震作用下的性能, 将 El Centro 波、鲁甸波及汶川波作用下边坡在不同工况下的永久位移进行对比分析.

由图 9 和表 3 可知, El Centro 波作用时边坡在 4 种工况下产生的永久位移最大, 鲁甸波次之, 汶川波最小, 说明不同地震波的频谱特性对边坡动力响应影响显著.

3 种地震波作用下, 边坡在未支护时产生的永久位移最大, 在桩锚组合支护时产生的永久位移最小, 边坡破坏概率最低, 说明桩锚组合结构加固的

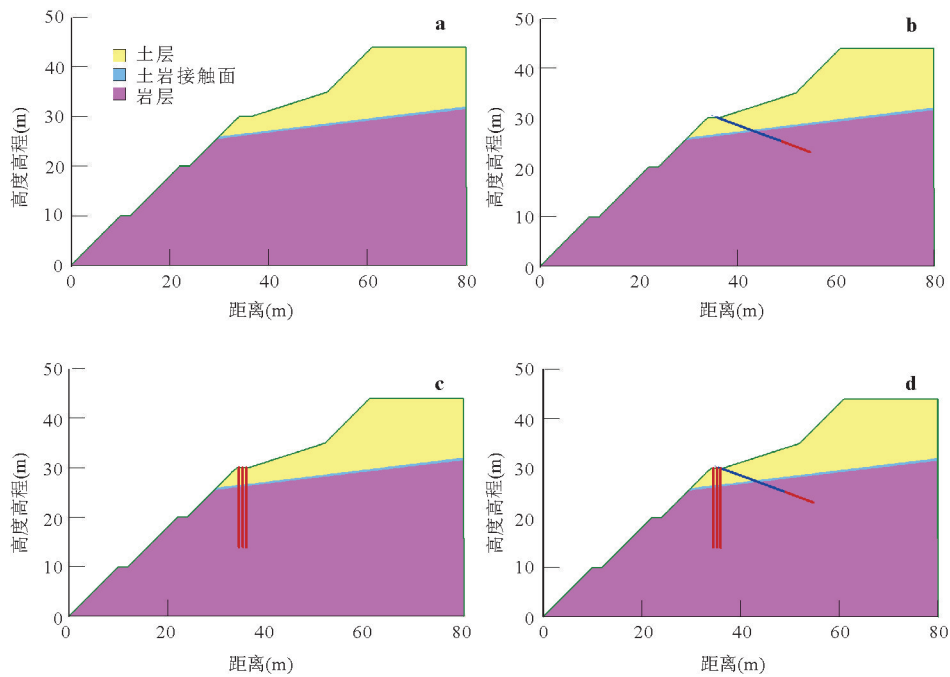


图 6 不同工况下边坡的支护设计

Fig.6 Support design diagram of slope under different working conditions

a. 未支护; b. 仅锚支护; c. 仅桩支护; d. 桩锚组合支护

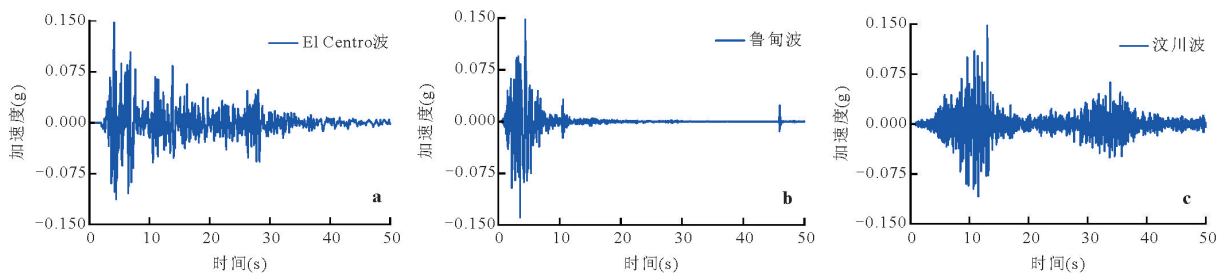


图 7 峰值加速度为 0.15 g 的不同地震波时程记录

Fig.7 Time history records of different seismic waves with peak acceleration of 0.15 g

a.El Centro波地震时程记录; b.鲁甸波地震时程记录; c.汶川波地震时程记录

表 1 边坡各层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock formation						
层 号	岩石名称	重度 γ (kN/m ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	阻尼比 D	泊松比 ν
1	土层	17.5	13	12	0.1	0.26
2	土岩界面	18	10	12	0.1	0.25
3	岩层	21	2 000	32	0.1	0.31

表 2 加固材料参数

Table 2 Parameters of reinforcement materials						
加固方式	弹性模量(kPa)	截面积(m ²)	截面惯性矩(m ⁴)	轴向预应力(kN)	倾角(°)	长度(m)
桩	2×10^8	0.025 45	5×10^{-4}	/	/	16
锚索锚固段	2×10^8	0.006 36	2.5×10^{-4}	/	20	12
锚索自由段	2×10^8	0.006 36	/	500	20	6

边坡稳定性最高,具有良好的抗震性能.

边坡动力变形模式与地震动时程特征存在显著的关联效应.以变化最为明显的 El Centro 波举例,分析图 9a 和图 10,根据地震动时程特征的直接关联性和力学响应与变形模式的匹配性将边坡的累积变形随时间的变化曲线可分为 4 个阶段.第 1 阶段(0~6 s),弹性变形,对应地震动初始加载阶段,地震加速度较小,加速度幅值低于边坡屈服加速度,边坡处于弹性变形状态,未产生永久变形;第 2 阶段(6~7 s),塑性突变,对应地震动主震脉冲峰值时段,此时输入能量超过边坡抗剪强度,触发塑性变形机制,符合 Newmark 滑块理论中“临界加速度突破”的判定条件,导致边坡产生较大的永久变形;第 3 阶段(7~31 s),累积滑移,对应地震动高频

波动持续作用期,加速度在屈服阈值上下波动,部分时刻边坡的加速度大于屈服加速度,导致永久位移呈阶梯式累积;第 4 阶段(31~50 s),稳定停滞,对应地震动能衰减阶段,边坡恢复弹性平衡状态,边坡加速度小于屈服加速度,位移趋于稳定,不再继续产生永久变形.

根据图 9a 和图 10 分析可知,未支护工况下边坡最终产生 7.86 cm 的永久变形.根据 Jibson and Michael(2009)定义的浅层滑坡的 Newmark 位移与破坏概率之间的关系,该工况下发生滑坡的概率为 15%~32%(表 4).仅锚支护时,边坡的累积变形随时间的变化曲线同样可分为 4 个阶段.在第 3 阶段相较于未支护时,永久变形呈阶梯状递增幅度明显减小,最终产生 4.70 cm 的永久变形,较未支护时减小 40%.锚索作为柔性支护手段可以有效地将下滑力传递给深层岩体,利用其约束作用来减少边坡变形.仅桩支护时,边坡的累积变形随时间的变化曲线与仅锚支护相近,最终产生 4.26 cm 的永久变形,较未支护时减小 46%,抗滑桩作为刚性支护手段,能够促使边坡内部应力重新分布,减少局部应力集中,从而降低弹性变形的风险,有效抵挡边坡的下滑力,并减小沿潜在滑面的塑性变形.采用桩锚组合支护时,边坡在第 2 阶段边坡产生的永久位移远小于其他工况,并且第 3 阶段边坡的永久位移几乎没增长,最终产生的永久位移仅为 0.84 cm,较未支

表 3 不同地震波作用时不同工况边坡屈服加速度和永久位移表

Table 3 Yield acceleration and permanent displacement of slope under different working conditions under different seismic waves

支护方式	未支护	仅锚支护	仅桩支护	桩锚组合支护
屈服加速度(m/s^2)	0.014 1	0.015 8	0.017 4	0.025 4
El Centro 波永久位移(m)	0.078 6	0.047 0	0.042 6	0.008 4
鲁甸波永久位移(m)	0.051 1	0.031 8	0.027 8	0.007 0
汶川波永久位移(m)	0.013 1	0.002 7	0.004 5	0.000 2

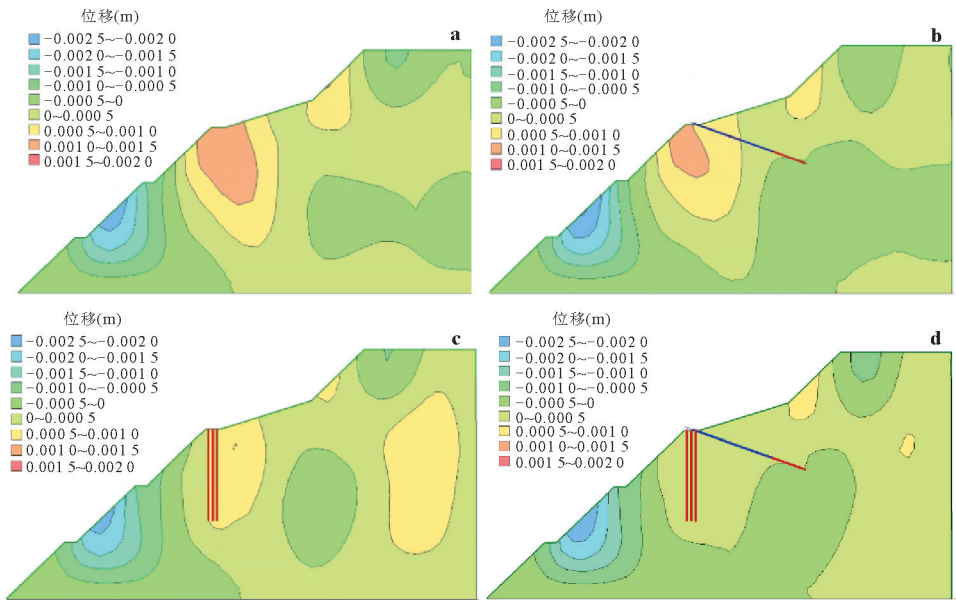


图 8 不同工况下边坡竖向位移变化云图

Fig.8 Nephogram of vertical displacement change of slope under different working conditions
a. 未支护; b. 仅锚支护; c. 仅桩支护; d. 桩锚组合支护

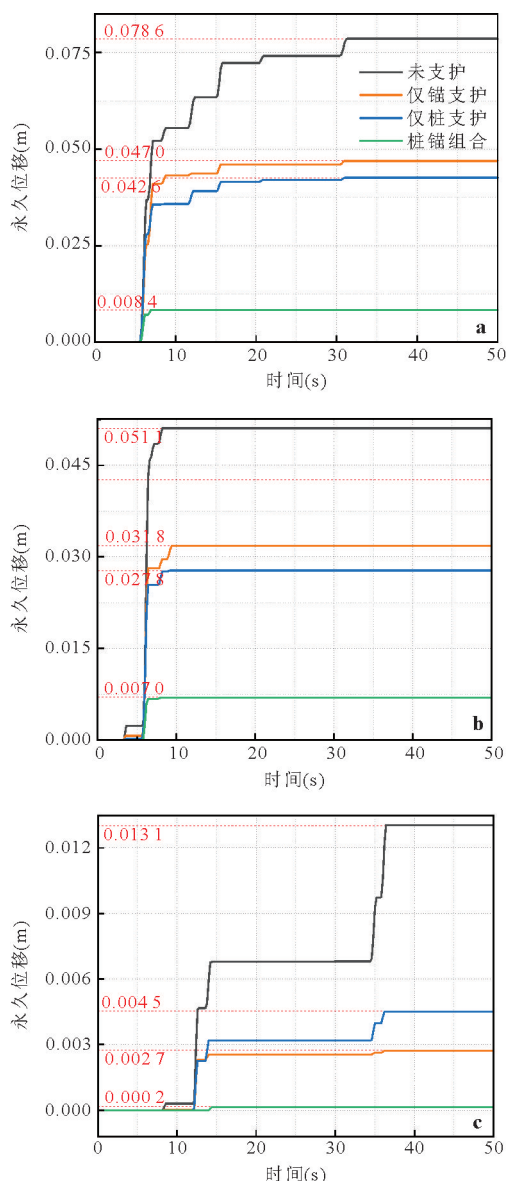


图 9 不同地震波作用下边坡永久位移—时间变化曲线

Fig.9 Permanent displacement-time curves of slope under different seismic waves

a.El Centro 波作用下边坡永久位移—时间变化曲线; b.鲁甸波作用下边坡永久位移—时间变化曲线; c.汶川波作用下边坡永久位移—时间变化曲线

护时减小 89%,滑坡发生的概率小于 2%,柔性的锚索和刚性的抗滑桩形成了主动受力的体系,可有效实现两者的协调受力,共同抵抗滑坡的下滑力.所以采用桩锚组合结构加固的边坡稳定性最高,破坏概率最低.

2.4.3 边坡安全系数分析 静力安全系数是通过拟静力法计算得来,是评价地震区域边坡稳定的最简单方法.未支护时,边坡的静力安全系数为 1.022.仅锚或仅桩支护时,边坡的安全系数均会提升.仅

表 4 Newmark 位移范围与失效概率之间的关系

Table 4 Relation between Newmark displacement range and failure probability

Newmark 位移(cm)	滑坡发生的可能性
0~1	低(0~2%)
1~5	中等(2%~15%)
5~15	高(15%~32%)
>15	很高(>32%)

锚支护时边坡的安全系数为 1.086,而仅桩支护时为 1.106.采用桩锚组合支护时,边坡安全系数为 1.175,满足一级边坡的稳定性要求(Jibson *et al.*, 1998).

Newmark 法分析时的安全稳定性系数为关于时间的函数.本文采用最小安全系数和平均安全系数来描述地震过程中的边坡稳定性.以 El Centro 波作用时边坡的安全系数为例,由图 11 可知,边坡安全系数时程曲线与输入地震波时程曲线保持同步变化.不同工况下,未支护时边坡的最小安全系数为 0.923,仅锚支护时为 0.937,仅桩支护时为 0.933,桩锚组合支护时为 0.955;地震作用下边坡的平均安全系数在未支护时为 1.042,仅锚支护时为 1.081,仅桩支护时为 1.090,桩锚组合支护时为 1.152.由此可见,较未支护边坡,不同支护方式下边坡的安全系数均有所提升,且桩锚组合支护的提升效果最明显.

采用拟静力法计算的安全系数相较于 Newmark 法结果偏大,说明在本案例中拟静力法高估了边坡的稳定性,可能会忽视潜在的安全风险,造成设计偏危险.因而,实际工程中要结合多种方法计算结果共同指导工程设计.

2.4.4 加固结构的内力 加固结构的内力包括锚固拉力、桩身弯矩和桩身剪力.由图 12 可知,不同地震波作用下,锚索锚固段的轴力分布规律基本相同.在锚固段 0~4 m 处,锚固段轴力随着锚固深度的增加而增加,在锚固段 4~6 m 处,锚固段轴力几乎没有变化.由此可以推测,在不考虑时空效应的条件下,在弹性范围内,预应力对锚固段的影响深度约为 4 m.El Centro 波作用下,仅锚支护时最大锚固拉力达到 141.1 kN,桩锚组合支护的锚固拉力达到 129.4 kN,降低了 8.3%;鲁甸波作用下,仅锚支护时最大锚固拉力达到 140.6 kN,桩锚组合支护的锚固拉力达到 135.1 kN,降低了 3.9%;汶川波作用下,仅锚支护时最大锚固拉力达到 134.3 kN,桩锚组合支护的锚固拉力达到 128.1 kN,降低了 4.6%.抗滑桩

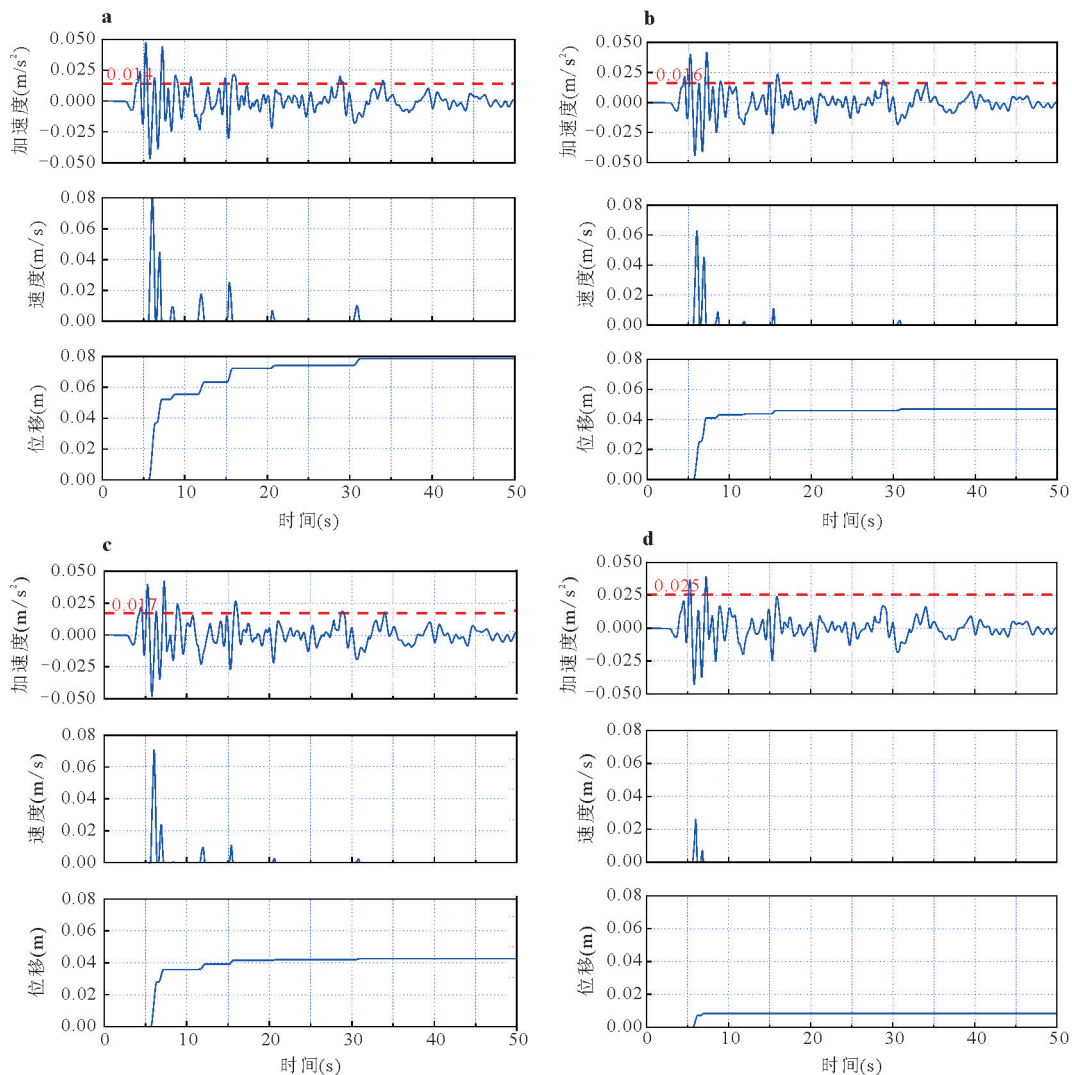


图 10 El Centro波作用时不同工况边坡平均加速度、速度、累积变形随时间变化曲线

Fig.10 Curve of average acceleration, velocity and cumulative deformation of slope under different working conditions under the action of EI Centro wave with time

a. 未支护; b. 仅锚支护; c. 仅桩支护; d. 桩锚组合支护

的被动加固发挥了作用,分担了部分荷载,减小了锚索的锚固拉力.与仅锚加固边坡相比,桩锚组合结构能有效降低地震荷载作用下锚索拉力,防止锚索因受力不足而破坏.

由图 13 可知,El Centro 波作用下,仅桩支护时桩身最大弯矩达到 74.9 kN·m,桩锚组合支护达到 70.0 kN·m,降低了 6.5%;鲁甸波作用下,仅桩支护时桩身最大弯矩达到 125.5 kN·m,桩锚组合支护的锚固拉力达到 57.3 kN·m,降低了 54.3%;汶川波作用下,仅桩支护时桩身最大弯矩达到 128.3 kN·m,桩锚组合支护的锚固拉力达到 63.0 kN·m,降低了 50.9%.不同地震波作用下弯矩的最大值出现于距桩顶约 3.5 m ($0.2 L_p$) 处,而滑面的范围位于距桩顶

3.3~3.8 m 处,这说明滑面处存在峰值弯矩,桩身弯矩绝对值达到最大.Poulos and Davis (1980)提出抗滑桩在极限承载状态下的“中间模式”是边坡加固治理中最为合理的受力模式.“中间模式”下抗滑桩的弯矩图为“S”形,可以提供最大的抗滑力.本文抗滑桩的弯矩分布符合“中间模式”,表明本文桩锚组合中抗滑桩的设计合理.

由图 14 可知,El Centro 波作用下,仅桩支护时桩身最大负剪力绝对值达到 84.6 kN,桩锚组合支护达到 79.8 kN,降低了 5.7%;鲁甸波作用下,仅桩支护时桩身最大负剪力绝对值达到 39.9 kN,桩锚组合支护的锚固拉力达到 17.6 kN,降低了 30.8%;汶川波作用下,仅桩支护时桩身最大负剪力绝对值达到

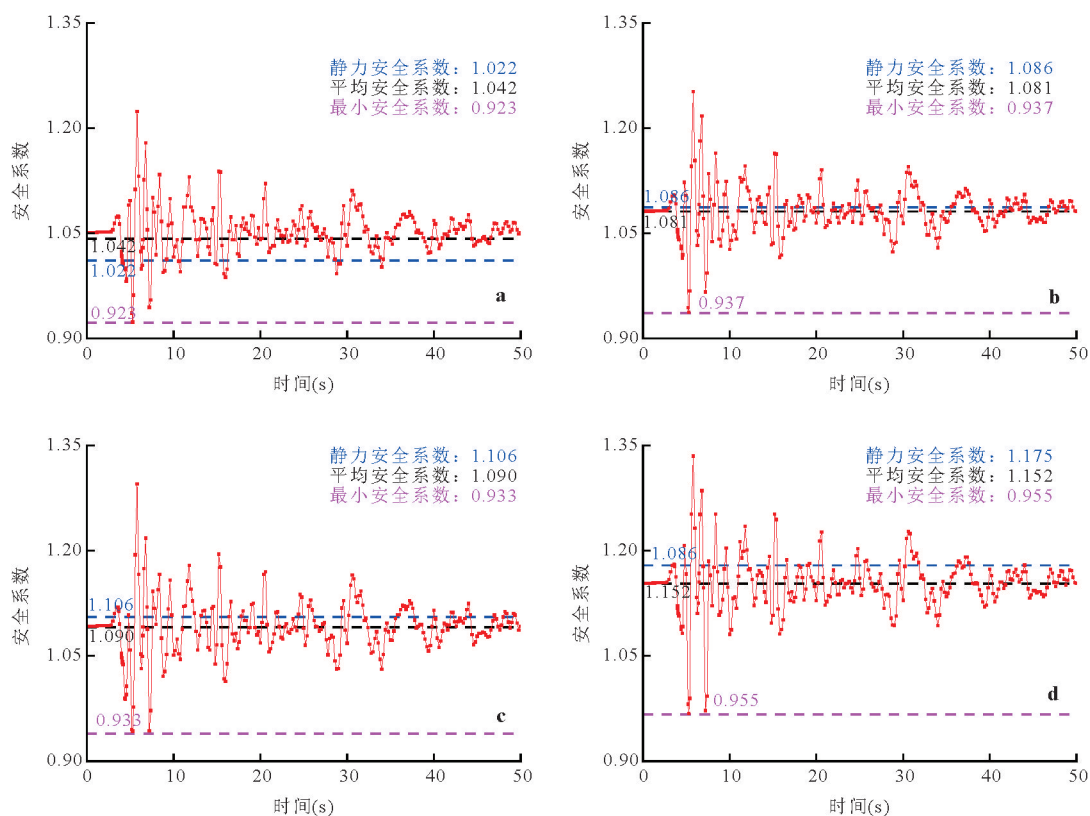


图 11 不同工况下边坡安全系数随时间变化曲线

Fig.11 Curves of slope safety factor with time under different working conditions

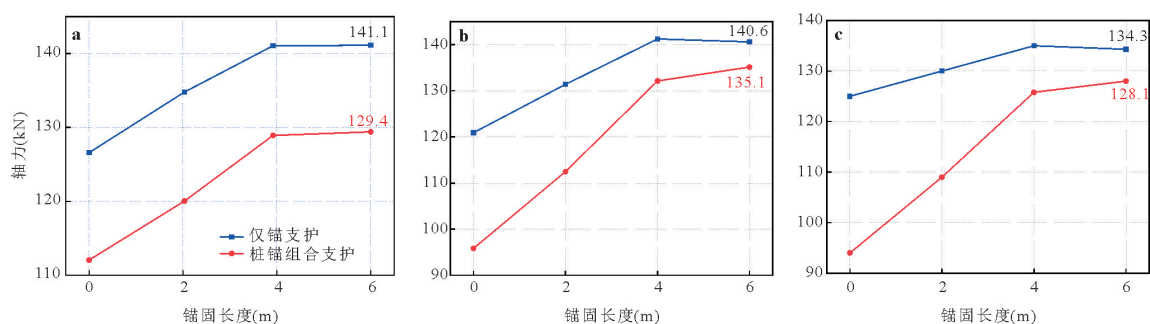


图 12 不同地震波下锚固段轴力分布

Fig.12 Axial force distribution of anchorage section under different seismic waves

a. El Centro 波作用下锚固段轴力分布; b. 鲁甸波作用下锚固段轴力分布; c. 汶川波作用下锚固段轴力分布

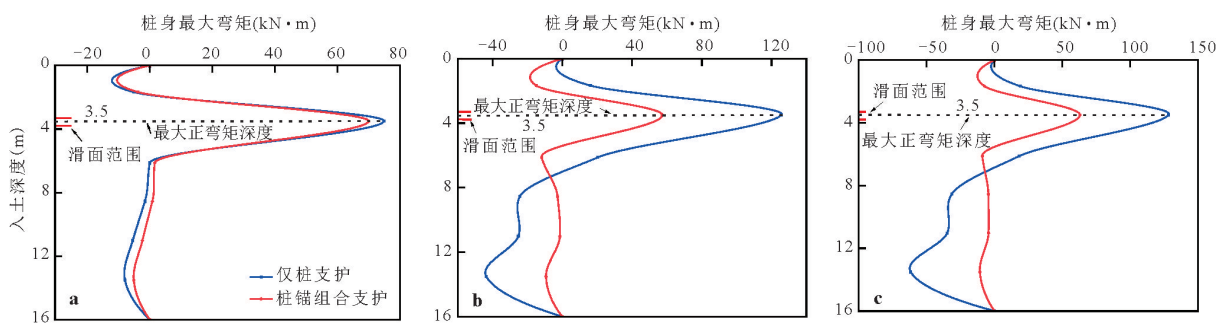


图 13 不同地震波下桩身最大弯矩分布

Fig.13 Distribution diagrams of maximum bending moment of pile under different seismic waves

a. El Centro 波作用下桩身最大弯矩分布; b. 鲁甸波作用下桩身最大弯矩分布; c. 汶川波作用下桩身最大弯矩分布

96.8 kN, 桩锚组合支护的锚固拉力达到 80.0 kN, 降低了 17.4%. 不同地震波作用下的最大正剪力位于滑动面以下, 距桩顶约 6 m ($0.4 L_p$), 最大负剪力位于滑动面处, 距桩顶约 3.5 m ($0.2 L_p$). 这表明滑面附近是抗滑桩最易发生破坏的位置, 因此强震区需注意防范抗滑桩在滑面处的剪切破坏.

综合图 12~14 发现, 在桩锚相互作用下, 锚索锚固段的轴力较仅锚支护有所降低, 钢管桩桩身最大弯矩和剪力也较仅桩支护时均有下降. 桩锚结构作为一种刚性和柔性结构组合加固结构, 可以减少滑面附近应力过度集中, 降低锚索拉力, 并改善钢管抗滑桩的受力状态, 进而有效防止地震中锚索因受力不足发生破坏及抗滑桩抗弯刚度不足而引起桩身弯曲破坏.

3 岩土体参数敏感性分析

不仅边坡支护结构影响屈服加速度和永久位移, 岩土体参数也将改变屈服加速度和永久位移. 本节将研究覆盖层土体黏聚力和内摩擦角对边坡

屈服加速度和永久变形的影响.

3.1 参数敏感性分析

从图 15 可知, 随着黏聚力和内摩擦角的增大, 边坡的屈服加速度呈正比例增加. 当黏聚力为 12 kPa、内摩擦角为 12° 时, 永久变形由开始的骤降逐渐转变为缓慢下降, 最终趋向于 0° .

3.2 参数敏感度分析

上文基于改变边坡土层的黏聚力、内摩擦角的大小, 研究了参数改变对边坡在地震作用下永久变形和屈服加速度的影响, 但是不能得到各个参数对边坡的影响程度大小. 基于此, 采用单因素敏感性分析法计算各参数的敏感度系数(章光和朱维申, 1993), 进而识别出边坡岩土层中影响边坡稳定性的主要因素.

$$S_k = \left| \frac{\Delta P}{P} \right| / \left| \frac{\Delta X_k}{X_k} \right|,$$

(8)

式中: S_k 为因素 X_k 的敏感度, $k=1, 2, \dots, n$; $|\Delta P/P|$ 为系统特性(即边坡屈服加速度和永久变形)的相对变化率; $|\Delta X_k/X_k|$ 为某一因素的相对变化率.

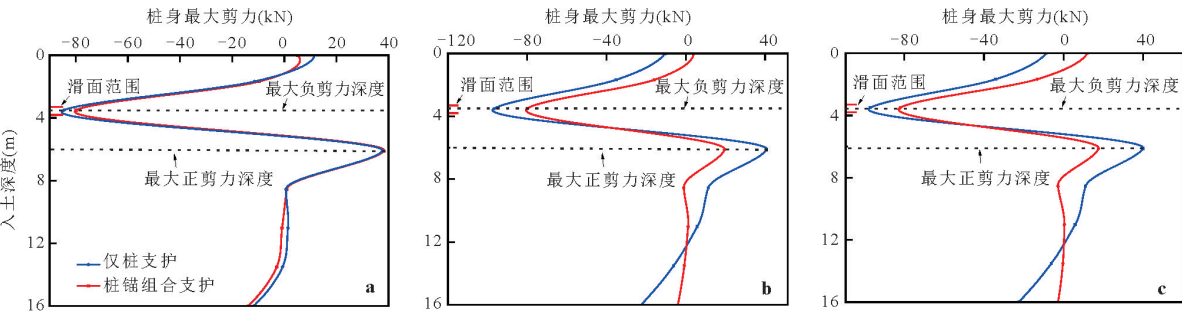


图 14 不同地震波下桩身最大剪力分布

Fig.14 Distribution diagrams of maximum shear force of pile under different seismic waves

a. El Centro 波作用下桩身最大剪力分布图; b. 鲁甸波作用下桩身最大剪力分布图; c. 汶川波作用下桩身最大剪力分布图

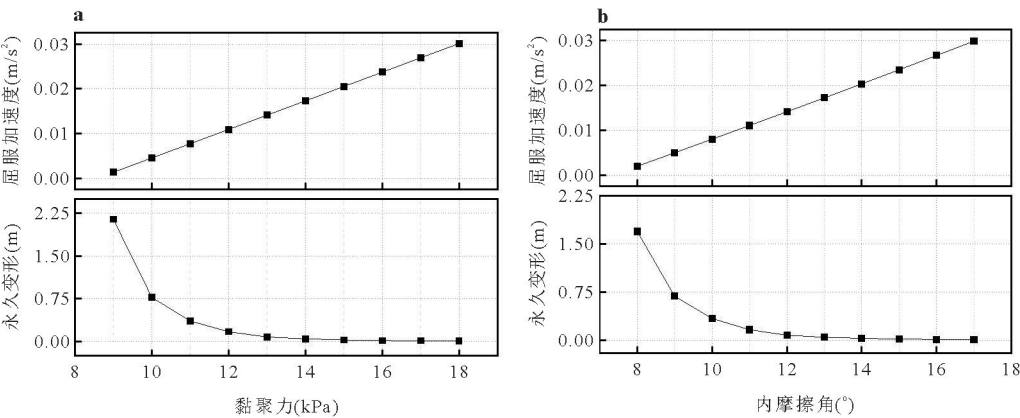


图 15 黏聚力(a)和内摩擦角(b)对边坡屈服加速度和永久变形的敏感性

Fig.15 Sensitivity of cohesion (a) and internal friction angle (b) to yield acceleration and permanent deformation of slope

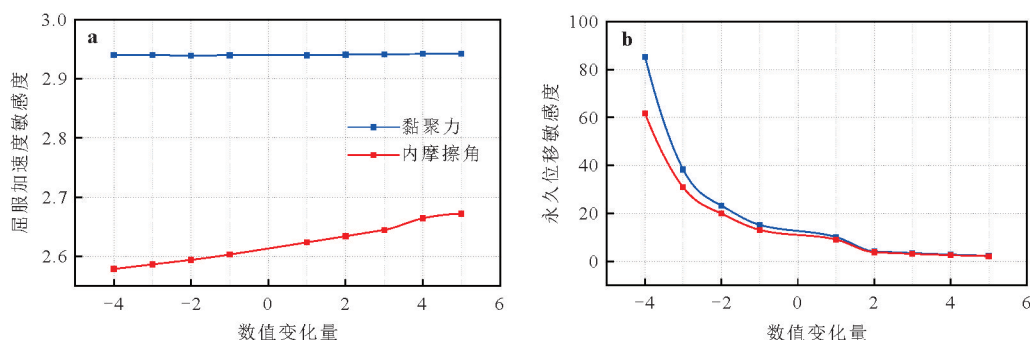


图 16 黏聚力、内摩擦角对边坡屈服加速度(a)和永久位移参数敏感度(b)曲线

Fig.16 Sensitivity curves of cohesion and internal friction angle to yield acceleration (a) and permanent displacement parameters (b) of slope

a. 黏聚力、内摩擦角对边坡屈服加速度的参数敏感度曲线; b. 黏聚力、内摩擦角对永久位移的参数敏感度曲线

图 16 为黏聚力和内摩擦角对边坡屈服加速度和永久变形的敏感度曲线。由图可知,边坡屈服加速度对黏聚力的敏感度大于内摩擦角。但边坡屈服加速度敏感度随着黏聚力的增大几乎不变,而其随着内摩擦角的增大呈现逐渐增大趋势。边坡永久位移对黏聚力的敏感度同样高于内摩擦角。这是由于边坡的潜在滑动面较浅,根据摩尔库伦强度准则,黏聚力的作用大于内摩擦角。

4 结论与展望

本文基于 Newmark 模型,提出了考虑地震时程特性的桩锚组合结构加固边坡动力响应分析方法,并将该方法应用于山东高速公路高边坡,分析了不同地震波下边坡在不同加固方式下的永久位移以及支护结构的内力,验证了桩锚组合结构在地震作用下的支护性能,并讨论了土体黏聚力和内摩擦角对边坡屈服加速度和永久位移的影响。主要结论如下:

(1)本研究基于 Newmark 模型,提出了桩锚组合结构加固边坡动力响应分析方法。该方法将桩锚结构与边坡视为统一协调变形体系,其中桩身弯矩、锚索拉力等参数可为边坡加固中结构的内力和配筋抗震设计提供重要依据。

(2)不同地震波下边坡产生的永久位移存在显著差异,其中 El Centro 波作用下的累积位移峰值最高,鲁甸波次之,汶川波最小。不同地震波下桩锚组合支护结构均有效减少了边坡的永久位移,同时将滑坡风险降低至 2% 以下,确保了边坡的一级稳定性。

(3)桩锚组合支护方式相较于仅锚支护和仅桩支护,显著减小了锚固端的最大锚固拉力、桩身最大剪力和最大弯矩。这种组合结构通过形成主动受力体系,实现了锚索和抗滑桩的协调作用,有效降低了地震荷载下锚索的拉力,并优化了抗滑桩的受力状况,是一种高效的加固方式。

(4)随着黏聚力和内摩擦角的增大,边坡屈服加速度呈正比例增加,而永久变形由骤降逐渐转变为缓慢下降,其中黏聚力的影响更为显著。

本文基于 Newmark 滑块位移法,提出考虑地震时程特性的桩锚组合加固边坡动力响应分析方法。然而,Newmark 滑块位移法将潜在滑坡体视为刚性滑块,针对非均质高塑性土边坡或大变形工况,可能与岩土体实际变形特性存在差异,后续研究中考虑引入弹塑性本构模型或连续介质模型,对传统 Newmark 模型进行改进。并进一步考虑地震持续时长、地下水、岩土体参数的不确定性等对桩锚组合加固边坡动力响应的影响。受限于项目周期,目前研究区域尚未经历地震,后续将持续收集现场监测数据,进一步完善研究成果。

References

- Chen, J. F., Du, C. C., Chen, S. X., et al., 2022. Mechanical Mechanism of Slopes Stabilized with Anti-Slide Piles and Prestressed Anchor Cable Frame Beams under Seismic Loading. *Earth Science*, 47(12): 4362–4372(in Chinese with English abstract).
- Chen, Q. G., Ge, H., Zhou, H. F., 2011. Mapping of Seismic Triggered Landslide through Newmark Method: An Example from Study Area Yingxiu. *Coal Geology of*

- China*, 23(11): 44—48, 56 (in Chinese with English abstract).
- Du, W. Q., 2018. Effects of Directionality and Vertical Component of Ground Motions on Seismic Slope Displacements in Newmark Sliding-Block Analysis. *Engineering Geology*, 239: 13—21. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.012>
- Fkramer, S. L., 1995. Geotechnical Earthquake Engineering. McGraw Hill Handbooks. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000042](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000042)
- Franklin, A.G., Chang, F.K., 1977. Earthquake Resistance of Earth and Rock-Fill Dams. Report 5: Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis. Department of Defense, Department of the Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory.
- Gao, S. F., Feng, Y. F., 2022. Simplified Analysis Method of Bank Slope Seismic Stability Based on Newmark's Sliding Block Method. *Port & Waterway Engineering*, (6): 40—48 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S. F., Gong, J. X., Feng, Y. F., 2015. Estimation of Earthquake-Induced Permanent Slope Deformation Based on Response Spectrum in Code. *Hydro-Science and Engineering*, (3): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Ge, H., Chen, Q. G., Wang, D. W., 2013. The Assessment and Mapping of Seismic Landslide Hazards: A Case Study of Yingxiu Area, Sichuan Province. *Geology in China*, 40(2): 644—652 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Wu, R. A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635—4658 (in Chinese with English abstract).
- Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A., 1998. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California, Area. US Department of the Interior, US Geological Survey, Washington, D.C., USA.
- Jibson, R.W., Michael, J. A., 2009. Maps Showing Seismic Landslide Hazards in Anchorage, Alaska. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center.
- Jin, K. P., Yao, L. K., Chen, M. D., 2019. Improvement of Newmark Model and Method Study of Risk Zoning for Earthquake Triggered Landslide. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 39(2): 301—308 (in Chinese with English abstract).
- Kokusho, T., 2019. Energy-Based Newmark Method for Earthquake-Induced Slope Displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121: 121—134. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.027>
- Lei, Z., Li, L. R., Long, J. F., et al., 2022. Improvement of Newmark Model and Prediction of Seismic Landslide Risk Based on Rainfall Infiltration. *China Earthquake Engineering Journal*, 44(3): 527—534 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. J., Chi, S. C., Lin, G., 2006. Newmark Slider Displacement Method Based on Dynamic Strength Model and Time-History Stress Analysis. *Rock and Soil Mechanics*, 27(S2): 1063—1068 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. F., Su, Y., Sun, Z. B., et al., 2020. 3D Seismic Displacement Analysis Method of Stepped Slopes Reinforced with Piles Based on Newmark Principle. *Rock and Soil Mechanics*, 41(8): 2785—2795 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Zhang, B. Y., 2019. Analysis of Seismic Permanent Displacement of a High Slope for a Hydropower Plant in Tibet. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 17(2): 125—131 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q., Li, L., Zhao, L. H., 2010. Quasi-Static Analysis of Seismic Stability of Anchored Rock Slope under Surge and Water Pressure Conditions. *Rock and Soil Mechanics*, 31(11): 3585—3593 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. W., Liang, Q. G., Zhao, T., et al., 2021. Review and Further Consideration on Research of Soil Dynamics. *World Earthquake Engineering*, 37(4): 217—230 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2014. Technical Code for Building Slope Engineering: GB 50330—2013. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).
- Nadukuru, S. S., Michalowski, R. L., 2013. Three-Dimensional Displacement Analysis of Slopes Subjected to Seismic Loads. *Canadian Geotechnical Journal*, 50

- (6): 650—661. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0223>
- Naylor, D. J., 1982. Finite Elements and Slope Stability. *Numerical Methods in Geomechanics*. Dordrecht: Springer Netherlands: 229—244. https://doi.org/10.1007/978-94-009-7895-9_10
- Newmark, N. M., 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Geotechnique*, 15(2): 139—160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- Nouri, H., Fakher, A., Jones, C. J. F. P., 2006. Development of Horizontal Slice Method for Seismic Stability Analysis of Reinforced Slopes and Walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(3): 175—187. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.11.004>
- Poulos, H. G., Davis, E. H., 1980. Pile Foundation Analysis and Design. Rainbow-Bridge Book Co., Wiley, New York. <http://worldcat.org/isbn/0471020842>
- Veylon, G., Luu, L. H., Mercklé, S., et al., 2017. A Simplified Method for Estimating Newmark Displacements of Mountain Reservoirs. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100: 518—528. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.003>
- Wilson, R. C., Keefer, D. K., 1983. Dynamic Analysis of a Slope Failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3): 863—877. <https://doi.org/10.1785/bssa0730030863>
- Wu, J. J., Chen, W. K., Jia, Y. J., et al., 2025. Rapid Seismic Intensity and Disaster Assessment Based on Dense Seismic Array: A Case of the 2025 Rikaze $M_s6.8$ Earthquake in Xizang. *Earth Science*, 50(5): 1770—1781(in Chinese with English abstract).
- Xu, G. X., Yao, L. K., Li, C. H., et al., 2012. Predictive Models for Permanent Displacement of Slopes Based on Recorded Strong-Motion Data of Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34(6): 1131—1136 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Wang, S. G., Fang, L. H., et al., 2025. Analysis of Earthquake Sequence and Seismogenic Structure of the 2025 $M_s6.8$ Dingri Earthquake in Tibetan Plateau. *Earth Science*, 50(5): 1721—1732(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. Y., Wang, C., Li, D. Y., et al., 2018. The Research Progress on Seismic Stability Analysis of Slopes in Water Conservancy and Hydropower Projects. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 16(3): 168—178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Zhu, W. S., 1993. Parameter Sensitivity Analysis and Optimizing for Test Programs. *Rock and Soil Mechanics*, 14(1): 51—58(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Lu, C., Kong, Y. N., 2020. Comparison of Chinese and Foreign Strong Seismic Design Methods for Bank Slope. *Port & Waterway Engineering*, (5): 218—223 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D. P., Zhang, J. J., Tang, Y., 2010. Seismic Damage Analysis of Road Slopes in Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(3): 565—576 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈建峰, 杜长城, 陈思贤, 等, 2022. 地震作用下抗滑桩—预应力锚索框架组合结构受力机制. *地球科学*, 47(12): 4362—4372.
- 陈启国, 葛华, 周洪福, 2011. 利用 Newmark 方法进行地震滑坡制图: 以映秀研究区为例. *中国煤炭地质*, 23(11): 44—48, 56.
- 高树飞, 冯云芬, 2022. 基于 Newmark 滑块位移法的岸坡地震稳定性简易分析方法. *水运工程*, (6): 40—48.
- 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬, 2015. 基于规范反应谱的码头岸坡地震永久变形计算. *水利水电工程学报*, (3): 37—44.
- 葛华, 陈启国, 王德伟, 2013. 地震滑坡危险性评价及编图: 以映秀震中区为例. *中国地质*, 40(2): 644—652.
- 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. *地球科学*, 49(12): 4635—4658.
- 金凯平, 姚令侃, 陈秒单, 2019. Newmark 模型的修正以及地震触发崩塌滑坡危险性区划方法研究. *防灾减灾工程学报*, 39(2): 301—308.
- 雷真, 李林锐, 隆交凤, 等, 2022. 基于降雨入渗的 Newmark 模型改进及地震滑坡危险性预测研究. *地震工程学报*, 44(3): 527—534.
- 李红军, 迟世春, 林皋, 2006. 基于动强度模式和时程应力分析的 Newmark 滑块位移法. *岩土力学*, 27(S2): 1063—1068.
- 李见飞, 苏杨, 孙志彬, 等, 2020. 基于 Newmark 滑块原理的抗滑桩加固三维土坡的地震位移分析方法. *岩土力学*, 41(8): 2785—2795.

- 刘彪, 张伯艳, 2019. 西藏某水电站高边坡地震永久位移分析. 中国水利水电科学研究院学报, 17(2): 125—131.
- 罗强, 李亮, 赵炼恒, 2010. 水力和超载条件下锚固岩石边坡动态稳定性拟静力分析. 岩土力学, 31(11): 3585—3593.
- 马晓文, 梁庆国, 赵涛, 等, 2021. 土动力学研究综述及思考. 世界地震工程, 37(4): 217—230.
- 吴佳杰, 陈文凯, 贾艺娇, 等, 2025. 基于密集台阵的地震烈度及灾情快速评估: 以 2025 年西藏日喀则 $M_s6.8$ 地震为例. 地球科学, 50(5): 1770—1781.
- 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等, 2012. 基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型. 岩土工程学报, 34(6): 1131—1136.
- 杨婷, 王世广, 房立华, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 $M_s6.8$ 地震余震序列特征与发震构造. 地球科学, 50(5): 1721—1732.
- 张伯艳, 王璨, 李德玉, 等, 2018. 地震作用下水利水电工程边坡稳定分析研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 16(3): 168—178.
- 章光, 朱维申, 1993. 参数敏感性分析与试验方案优化. 岩土力学, 14(1): 51—58.
- 张磊, 陆澄, 孔友南, 2020. 中外岸坡抗强震设计方法对比. 水运工程 (5): 218—223.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014. 建筑边坡工程技术规范 GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周德培, 张建经, 汤涌, 2010. 汶川地震中道路边坡工程震害分析. 岩石力学与工程学报, 29(3): 565—576.

《地球科学》

2025 年 11 月 第 50 卷 第 11 期 要目预告

- 中国海陆过渡相页岩气形成、潜力与挑战 邹才能等
- 江南造山带西段北侧边界厘定: 来自黔东南大坪捕虏花岗岩的证据 王 坤等
- 孕灾环境对泥石流危险性影响 李永威等
- 考虑井储效应的双重介质单孔抽水非稳定流解析模型 魏世毅等
- 苏锡常地下空间开发对地下水流场的影响 宋 昀等
- 火山岩风化区农田重金属污染及健康风险评价——以海口江东新区为例 左文萍等
- 基于广域一编码源电磁测深的白银厂小铁山 VHMS 型矿床深部找矿模型构建 郭小刚等
- 藏东玉龙斑岩铜矿剥蚀历史与保存程度—热年代学约束 甘圣添等
- 新疆古生代斑岩铜矿叠加成矿模式 陈华勇等